УДК 004.932.2:616-006.04

О.М. Березький
Тернопільський національний технічний університет, Україна
Україна, 46009, м. Тернопіль, вул. Львівська, 11

Похибки перетворення типу «область – область» в автоматизованих системах аналізу цитологічних зображень

O.M. Berezsky
Ternopil National Economic University, Ukraine
Ukraine, 46009, t. Ternopol, Lvivska st., 11

Transformation of Type a «Region - Region» Errors in the Automated Systems of Cytological Image Analysis

О.Н. Березский
Тернопольский национальный экономический университет, Украина
Украина, 46009, г. Тернополь, ул. Львовская, 11

Погрешности преобразования типа «область – область» в автоматизированных системах анализа цитологических изображений

Розглянуті похибки, які виникають при перетворенні типу «область – область». Запропоновано метод перетворення областей зображень, який базується на перетворенні скелетів областей. Розроблений алгоритм визначення похибки перетворення типу «область – область». Розроблені алгоритми програмно реалізовані в середовищі Borland Delphi 7.0. Досліджені похибки перетворення типу «область – область» в автоматизованих системах аналізу цитологічних зображень.
Ключові слова: похибки перетворення типу «область – область», скелети, цитологічні зображення, автоматизовані системи.

Errors, arising up at transformation of type «region – region», are considered. The method of regions image transformation, based on skeletons transformation of region, is offered. The algorithm of determination transformation of type a «region – region» error, is developed. The developed algorithms are programmatically realized in the environment of Borland Delphi 7.0. The transformations of type «region – region» errors in the automated systems of cytological image analysis are analyzed.
Key words: transformation of type are a «region – region», skeletons, cytological image, automated systems.

Рассмотрены погрешности, возникающие при преобразовании типа «область – область». Предложен метод преобразования областей изображений, основанный на преобразовании скелетов областей. Разработан алгоритм определения погрешности преобразования типа «область – область». Разработанные алгоритмы, программно реализованые в среде Borland Delphi 7.0. Исследованы погрешности преобразования типа «область – область» в автоматизированных системах анализа цитологических изображений.
Ключевые слова: погрешности преобразования типа «область – область», скелеты, цитологические изображения, автоматизированные системы.

Вступ

Сучасні автоматизовані засоби опрацювання біомедичних зображень (АЗОБМЗ) складаються в основному з таких модулів: модуля вводу зображень, який представ-

лений світловим мікроскопом і відеокамерою, персональним комп'ютером, котрий забезпечує опрацювання зображень і принтером для документування результатів аналізу на папері [1].

За функціональним призначенням АЗОБМЗ поділяються на два типи: дослідницькі та спеціалізовані. Дослідницьким АЗОБМЗ характерний широкий набір функцій опрацювання зображень. Спеціалізовані АЗОБМЗ працюють у напівавтоматичному або автоматичному режимах і виконують одну визначену наперед послідовність автоматичних операцій з опрацювання зображень.

Програмне забезпечення АЗОБМЗ включає в себе такі модулі: попереднє оброблення, сегментація, вимірювання, класифікація, статистичне оброблення мікрооб'єктів [1-3].

Цитологічні зображення – це зображення окремих клітин. Мікрооб'єктами на цитологічних зображеннях є цитоплазма, вакуолі, ядро, ядерця, хроматин і т.п. [4].

При постановці діагнозу важливою проблемою є виявлення і дослідження діагностичних ознак. Інформативною діагностичною ознакою при протіканні патологічних процесів є форма окремої клітини і дослідження закономірностей її зміни. На даний час в існуючих АЗОБМЗ відсутні модулі аналізу зміни форми клітин. Тому актуальною задачею є дослідження зміни форми клітин із заданою похибкою перетворення.

Постановка задачі

Нехай задані зображення Im_1 та Im_2. Представимо їх у вигляді:

$$Im_i = C_i \cup O_i,\ i = \overline{1,2},$$

де C_i – контур, O_i – внутрішня область.

Згідно з теоремою Жордана [5], для замкнутих областей існує перетворення, яке перетворює одну область в іншу область, тобто $O_2 = Q(O_1)$, де Q – ідеальне перетворення області O_1 в область O_2. Реальне перетворення Q^r знаходиться над апроксимованими областями O_1' і O_2' за допомогою виразу $O_2' = Q^r(O_1')$. Похибку перетворення будемо визначати як площу S симетричної різниці областей O_2 і O_2', тобто $\delta_T = S(O_2 \Delta Q^r(O_1))$.

Необхідно знайти складові похибки перетворення δ_T.

Метод перетворення типу «область – область»

Для двох заданих зображень $Im_1 = C_1 \cup O_1$ та $Im_2 = C_2 \cup O_2$ області O_1 та O_2 є замкненими обмеженими областями на площині $\mathbf{R}^2$. Контури C_1 і C_2 є межами областей O_1 та O_2, тобто $C_1 = \partial O_1$, $C_2 = \partial O_2$. Як відомо [6], скелет області визначається так: $D \in O; pr(D) = \{D' \in \partial O \,|\, |D' - D| = \inf |D'' - D|\},\ D'' \in \partial O$. Тоді цю множину називають метричною проекцією точки D.

Для евклідової метрики використовується таке означення скелета:

$$sk(O) = \{C' \in \partial O \,|\, \text{множина } pr(D) \text{ складається більше, ніж з однієї точки}\}.$$

Точка належить скелету, якщо вона є центром максимально вписаного в область круга. Використаємо не евклідову метрику, а l_∞ метрику, тобто метрику, що задана формулою $|A - B| = \max\{|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|\}$, де (x_1, y_1) – координати точки A, (x_2, y_2) – координати точки B.

Для l_∞ метрики точка належить скелету, якщо вона є центром максимально вписаного в область квадрата зі сторонами, паралельними координатним осям.

Як показано в роботі [7], що у випадку кусково-лінійної межі області її скелет також є кусково-лінійним. Крім цього доведено, що якщо область є однозв'язною, то її скелет є деревом. Звідси випливає, що скелет в даному випадку є скінченним об'єднанням відрізків.

Підсумовуючи вищенаведені міркування, можна сказати, що для однозв'язних областей скелет є деформаційним ретрактом області, тобто $O \to sk(O)$. Скелет є графом без циклів, тобто його можна представити у вигляді $sk(O) = (V, E)$, де V – множина вершин, а E – множина гілок.

Перетворення типу «область – область» $O_1 \to O_2$ зведемо до перетворення скелетів $sk(O_1) \to sk(O_2)$.

Заміна областей скелетами дає змогу перейти від двомірного до одномірного перетворення. Це спрощує задачу перетворення, але приводить до появи похибки відтворення області за її скелетом. У загальному випадку скелетизація – це некоректна задача [8]. Початковий скелет кожної області є зашумленим. Тому постає задача видалення шумових гілок.

У статті [9] введено поняття ε-скелету і показано, що ε-скелетом називається скелет, для якого виконується умова:

$$sk_\varepsilon(O) = \{x \in IntO \mid diam\ pr(x) \geq \varepsilon\},$$

$$pr(x) = \left\{ y \in \partial O \middle| |x - y| = \min_{y' \in O} |x - y'| \right\}.$$

Початковий скелет розкладається на ε-скелети, тобто $sk(O) = \bigcup_{i=1}^{n} sk_{\varepsilon_i}(O)$. Представимо скелет області у вигляді $sk(O) = (V, E, W)$, де – W множина ваг гілок скелету. Дана множина $W = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, ..., \varepsilon_n\}$ складається з ε_i ваг точок гілок $e_i \in E$. При розкладі початкового скелета $sk(O)$ на ε-скелети справедливе:

$$sk(O) \supset sk_{\varepsilon_1}(O) \supset sk_{\varepsilon_2}(O) \supset ... \supset sk_{\varepsilon_n}(O),$$

тобто кожен наступний скелет є підграфом початкового графа. Ця операція відсікання гілок називається «обрізанням» початкового скелета.

Нехай $\delta_{sk(O)}$ – похибка відтворення області O за її скелетом. Тоді «обрізання» гілок скелету проводимо до виконання умови $S(sk(O), sk_\varepsilon(O)) \leq \delta_{sk(O)}$, де S – площа симетричної різниці між початковою областю O та областю O', відтвореною за допомогою ε-скелета. З кожною точкою $k \in sk(O)$ зв'язаний максимальний порожній квадрат області $O(k) = \{o : d(o,k) \leq a(k)\}$, де $a(k)$ – сторона квадрата з центром в точці k.

Об'єднання $O_{sk} = \bigcup_{k \in sk(O)} O(k)$ – множина максимально порожніх квадратів з центрами на гілках скелету $sk(O)$, яка збігається із самою областю O.

Для оцінки похибки перетворення між областями $O_1 \to O_2$ використаємо симетричну різницю: $\delta_T = S(O_2 \Delta Q^r(O_1))$ і δ_{O_1}, δ_{O_2} – похибки відтворення областей O_1 та O_2 за їх скелетами. При цьому справедливе таке твердження.

Твердження. Верхня границя похибки перетворення між двома областями рівна: $\delta_T \approx \delta_{O_1} + \delta_{O_2}$.

Доведення. За означенням похибка перетворення рівна $\delta_T = S(O_2 \Delta Q^r(O_1))$. Представимо її у вигляді $\delta_T = O_2 \setminus Q^r(O_1) \cup Q^r(O_1) \setminus O_2$. Обчислимо відносну похибку симетричної різниці. Вона рівна :

$$\delta_T = \delta_{O_2} + \delta_{Q^r}\delta_{O_1} + \delta_{Q^r}\delta_{O_1} + \delta_{O_1} = \delta_{O_1} + \delta_{O_2} + 2\delta_{Q^r}\delta_{O_1}.$$

Оскільки $\delta_{Q^r} << \delta_{O_1}$ то $\delta_T \approx \delta_{O_1} + \delta_{O_2}$.

Алгоритм визначення похибки перетворення типу «область – область»

Алгоритм визначення похибки перетворення типу «область – область», використовуючи запропонований метод перетворення областей на основі перетворень скелетів представимо у вигляді послідовності таких кроків:

1. Представимо контури зображень Im_1 і Im_2 в полярній системі координат $C_1 \to r_1(\theta)$, $C_2 \to r_2(\theta)$.

2. Апроксимуємо знайдені контури кусково-лінійними функціями

$$C_i = \bigcup_{j=1}^{n} \{\theta, a_j\theta + b_j | \theta \in [0, T]\},\ a_j,\ b_j,\ \theta \in R,\ i = \overline{1,2}$$

із заданими похибками апроксимації контурів δ_{C_1}, δ_{C_2}.

3. Використовуючи алгоритми, які розроблені в статтях [7], [9], знайдемо скелети областей $sk_1(O_1)$ і $sk_2(O_2)$ в l_∞ метриці.

4. Представимо отримані скелети у вигляді $sk_1(O_1) = (V_1, E_1, W_1)$, $sk_2(O_2) = (V_2, E_2, W_2)$.

5. На основі введених множин ваг точок гілок скелетів W_1 та W_2 проводимо регуляризацію скелетів.

6. Оцінюємо похибки відтворення скелетів областей δ_{O_1} та δ_{O_2}.

7. Знаходимо похибку перетворення $\delta_T = \delta_{O_1} + \delta_{O_2}$.

У свою чергу, похибка відтворення області рівна сумі похибки апроксимації контура області δ_C і похибки відтворення за допомогою скелета апроксимованої області $\delta_{sk(O)}$, тобто: $\delta_O = \delta_C + \delta_{sk(O)}$.

Експериментальні дослідження

Для знаходження похибки перетворення типу «область – область» програмно реалізовано ряд розроблених алгоритмів: алгоритм апроксимації контуру із заданою похибкою апроксимації, алгоритм виділення скелету, алгоритм «обрізання» малоінформативних гілок скелету на основі критеріїв втрати площі та периметру, алгоритм обчислення похибки перетворення типу «область – область» та ряд інших допоміжних алгоритмів. Для проведення експериментів були використані цитологічні зображення, отримані в Тернопільському державному університеті ім. І.Я. Горбачевського.

Для визначення функції перетворення та обчислення похибки перетворення типу «область – область» необхідно виконати такі кроки: завантажити вхідне цито-

логічне зображення та провести попереднє оброблення, за допомогою алгоритму сегментації на основі попередніх розміток виділити мікрооб'єкти на вхідному зображенні, визначити контурні функції мікрооб'єктів за допомогою алгоритму проходження контуром з можливістю зворотного ходу, провести апроксимацію контурів мікрооб'єктів із заданою похибкою. Приклад виділених мікрооб'єктів приведено на рис. 1.

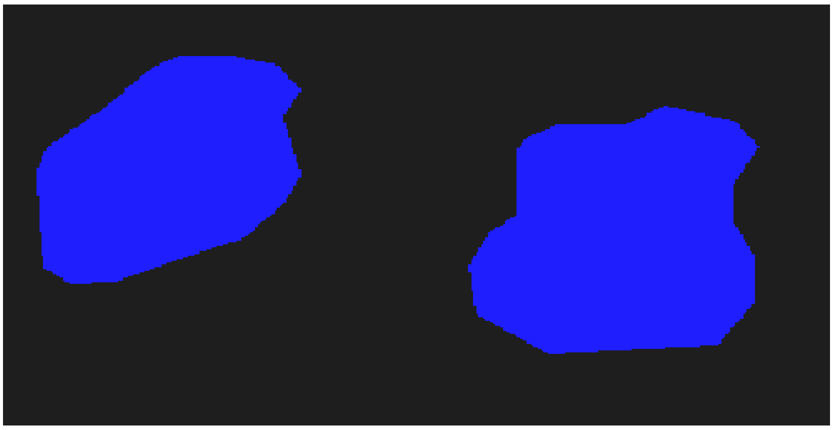


Рисунок 1 – Приклад виділення та апроксимації контурів двох мікрооб'єктів

На наступному етапі здійснено обчислення координат точок, що належать скелетам відповідних мікрооб'єктів. Оскільки скелетизація проводиться над мікрооб'єктами, представленими у цифровому форматі, отриманий скелет містить незв'язні між собою частини, містить «діри» та велику кількість надлишкових точок, що приводить до утворення великої кількості малоінформативних гілок. Приклад виділення скелетів наведено на рис. 2. Для усунення даного недоліку використано морфометричні операції дилатації та ерозії, що дозволило отримати скелети мікрооб'єктів товщиною гілки в один піксел.

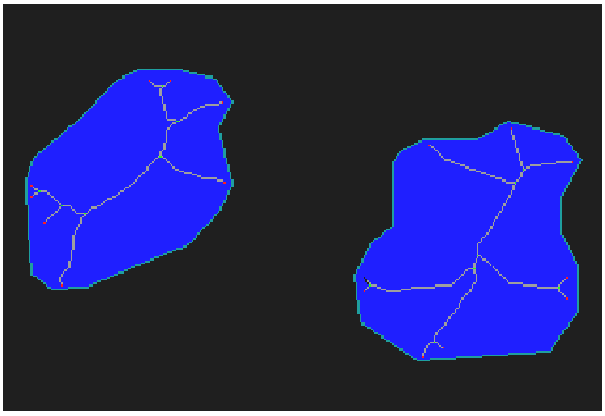


Рисунок 2 – Приклад виділених скелетів товщиною гілки в один піксел

Після застосування морфометричних операцій залишаються малоінформативні гілки скелетів, які необхідно видалити на основі критеріїв втрати площі та втрати периметру, що дозволило зменшити складність процесу перетворення, не перевищуючи при цьому допустиму похибку.

В результаті проведення комп'ютерних експериментів було опрацьовано понад 100 цитологічних зображень патологічних клітин долькового раку молочної залози.

Перетворення типу «область – область» були здійснені в афінному [10] і топологічних просторах. Експерименти показали, що похибки перетворення в афінному

просторі в 2 – 3 рази більші за похибки перетворення в топологічному просторі. Максимальні похибки перетворення типу «область – область» в топологічному просторі наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати визначення похибок перетворення типу «область – область»

Номер експерименту	Площа першого мікрооб'єкта (піксел)	Площа другого мікрооб'єкта (піксел)	Похибка перетворення типу «область – область»(%)
1	10832	11776	1,81
2	8562	7456	2,03
3	14036	12754	1,58
4	10856	11562	2,38

Висновки

У роботі запропонований метод перетворення типу «область – область» на основі перетворення скелетів областей. Досліджено джерела похибок при перетворенні областей та здійснена їх оцінка. Показано, що похибка перетворення типу «область – область» залежить від похибок відтворення областей зображень, які складаються з похибок апроксимації контурів і похибок відтворення областей зображень за їх скелетами. Проведені комп'ютерні експерименти показали, що похибки перетворення в топологічному просторі в 2 – 3 рази менші за похибки перетворення в афінному просторі.

Література

1. Егорова О.В. Компьютерная микроскопия / Егорова О.В., Клыкова Е.И., Пантелеев В.Г. – М. : Техносфера, 2005. – 300 с.
2. Абламейко С.В. Медицинские информационные технологии и системы / Анищенко В.В., Лапицкий В.А., Тузиков А.В. ; ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2007. – 176 с.
3. Абламейко С.В. Обработка оптических изображений клеточных структур в медицине / С.В. Абламейко, А.М. Недзьведь ; НАН Беларуси, Объед. ин-т проблем информатики. – Минск, 2005. – 156 с.
4. Автандилов Г.Г. Основы количественной паталлогической анатомии / Автандилов Г.Г. – М. : Медицина, 2002. – 238 с.
5. Косневски Ч. Начальный курс алгебраической топологии / Косневски Ч. – М. : Мир, 1983. – 304 с.
6. Blum H. A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape / H. Blum // Models for the Perception of Speech and Visual Form. – USA : MIT Press, 1967. – P. 362–380.
7. Березский О. Н. Топологические методы и алгоритмы преобразования контуров и областей плоских изображений / О.Н. Березский // Проблемы управления и информатики. – 2010. – № 5.
8. Местецкий Л. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры / Л. Местецкий. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 288 с.
9. Березький О.М. Топологічне перетворення областей: випадок неізоморфних скелетів / О.М. Березький // Відбір і обробка інформації. – 2010. – Вип. 33 (109). – С. 67–74.
10. Березький О.М. Методи та алгоритми перетворення контурів зображень в афінному просторі / О.М. Березький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології. − 2009. − № 638. − С. 185-189.

Literatura

1. Egorova O. V. Kompyuternaya mikroskopiya / O. V. Egorova, E. I. Klyikova, V. G. Panteleev – M.: Tehnosfera, 2005. – 300 s.
2. Ablameyko S. V. Meditsinskie informatsionnyie tehnologii i sistemyi / V. V. Anischenko, V. A. Lapitskiy, A. V. Tuzikov; OIPI NAN Belarusi – Minsk, 2007. – 176 c.
3. Ablameyko S. V. Obrabotka opticheskih izobrazheniy kletochnyih struktur v meditsine / Ablameyko S. V., Nedzved A. M.; NAN Belarusi, Ob'ed. in-t problem informatiki. – Minsk, 2005. – 156 s.

4. Avtandilov G. G. Osnovyi kolichestvennoy patallogicheskoy anatomii / G. G. Avtandilov – M.: Meditsina, 2002. – 238 s.
5. Kosnevski Ch. Nachalnyiy kurs algebraicheskoy topologii / Ch. Kosnevski. – M.: Mir, 1983. – 304 s.
6. Blum H. A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape / H. Blum // Models for the Perception of Speech and Visual Form. – USA: MIT Press, 1967. – P. 362–380.
7. Berezskiy O. N. Topologicheskie metodyi i algoritmyi preobrazovaniya konturov i oblastey ploskih izobrazheniy / O. N. Berezskiy // Problemyi upravleniya i informatiki. – 2010. – № 5.
8. Mestetskiy L. Nepreryivnaya morfologiya binarnyih izobrazheniy: figuryi, skeletyi, tsirkulyaryi / L. Mestetskiy. – M.: Fizmatlit, 2009. – 288 c.
9. Berezkiy O. M. Topologichne peretvorennya oblastey: vipadok neizomorfnih skeletiv / O. M. Berezkiy // Vidbir i obrobka informatsiyi. – 2010. – Vip. 33 (109). – S. 67–74.
10. Berezkiy O. M. Metodi ta algoritmi peretvorennya konturiv zobrazhen v afinnomu prostori // Visnik Natsionalnogo universitetu «Lvivska politehnika». Komp'yuterni nauki ta Informatsiyni tehnologiyi. − 2009. − № 638. − S. 185–189.

RESUME

O.M. Berezsky

Transformation of Type a «Region – Region» Errors in the Automated Systems of Cytological Image Analysis

The modern automated tools of biomedical image processing consist mainly of such modules: module of image input, which is presented a light microscope and video camera, by the personal computer, and printer. Software of the automated tools of biomedical image processing includes next modules: previous processing, segmentation, measuring, classification, statistical processing of micro objects. The important problem of making a diagnosis is a detection and research of diagnostic symptoms. The informing diagnostic symptom at flowing of pathological processes is a form of separate cells and research of mechanism of its change. Nowadays, the modules of cells change form analysis are absent in the existing automated tools of biomedical image processing.

Transformation of type «region – region» errors are considered in the article. The method of transformation image regions is offered, which is based on skeletons transformation of regions in l_∞ metric. The algorithm of determination of transformation type «region – region» errors is developed. Transformation of type «region – region» errors in the automated systems of cytological image analysis is analyzed.

In the article shown, that transformation of type «region – region» error depends on the errors of regeneration of image regions, which consist of approximation contours errors and errors of regeneration of image regions on base skeletons. Computer experiments are conducted in Borland Delphi 7.0. environment. As a result, the transformation errors in topology space in 2 – 3 times less for transformation errors in affine space.

Стаття надійшла до редакції 12.04.2013.